超级早籼稻“中早 39”的高产育种研究*

季芝娟 曾宇翔 梁燕 杨长登**1

（中国水稻研究所水稻生物学国家重点实验室 杭州 310006）

摘要 利用高产早籼嘉育 253 和高产抗稻瘟病早籼品种中组 3 号为亲本，采用分离世代全程自然病圃鉴定结合稻瘟病混合菌株人工接种抗性筛选方法，通过系谱法和产量比较试验，最终选育获得高产抗稻瘟病早籼稻新品种中早 39。对超级早籼稻品种中早 39 及其系谱亲本嘉育 253 和中组 3 号进行产量相关性状、光合特性、叶面积指数和光合色素含量等测定和比较分析，发现中早 39 的每穗总粒数和结实率优于其系谱亲本，库容优势明显；中早 39 在齐穗后保持最高的净光合速率，其叶面积指数和各光合色素含量也一直优于系谱亲本；因此，中早 39 具有超高产光合生理特性。育种初期选用了高产亲本，且中早 39 比其系谱亲本具有更优的光合生理特性，说明水稻高产育种中优良性状的整合；中早 39 超高产优势来自于品种选育过程中源库的优化、株叶形态的改善；本研究为水稻高产育种提供了参考信息。

关键词 籼稻 中早 39 高产 育种 生理

Research on high yield breeding of Super Early *Indica* Rice “Zhongzao 39”

JI Zhi-juan ZENG Yu-xiang LIAN Yan YANG Chang-deng

(State Key Laboratory of Rice Biology, China National Rice Research Institute, Hangzhou 310006, China)

Abstract Early Indica rice variety “Jiayu 253” and “Zhongzu 3” were used as parents to breed a new variety “Zhongzao 39” through pedigree method and yield comparison trial. Natural disease nursery and artificial inoculation of mixed strains of blast for each segregation generation were conducted. The variety “Zhongzao 39” and its pedigree parents “Jiayu 253” and “Zhongzu 3” were further compared on yield

*浙江省农业（粮食）新品种选育重大科技专项（2016C02050-4）、国家重点研发计划（2016YFD0101104）资助项目

**通讯作者，电子邮箱：yangchangdeng@126.com

related traits, photosynthetic characters, leaf area indexes and photosynthetic pigment contents. Results showed that total grain number per panicle and seed setting rate of Zhongzao 39 were higher than that of its pedigree parents, indicating its excellent sink. The highest net photosynthetic rate of Zhongzao 39 was demonstrated after the stage of full heading stage. Its leaf area index and photosynthetic pigment content were showed the most high as well. Therefore, Zhongzao 39 demonstrated elite photosynthetic physiological characters for high yield. Using high-yield pedigree parents in breeding and integration of elite traits during breeding contribute to the high-yield of Zhongzao 39. The super high yield advantage is obtained from source sink optimization and improvement of plant leaf morphology during rice breeding, which gives reference information for rice high-yield breeding.

Key words *Indica* rice Zhongzao 39 High yield breeding physiological characters

随着世界人口的不断增加和耕地面积的持续减少，粮食安全问题日益受到世界各国的重视。我国水稻（*Oryza sativa* L.）高产育种经历了从 20 世纪 50 年代的矮化育种，到 70 年代的杂交水稻育种，及至近年的超级稻育种。为保证粮食安全，我国于 20 世纪 90 年代中期启动了超级稻育种计划，截至 2016 年 4 月前，全国认定的超级稻品种达 125 个，一批优质高产的超级稻新品种已经广泛应用于生产。

常规早籼稻品种中早 39，2009 年通过浙江省审定，2012 年通过国家审定，2013 年被农业部认定为超级稻品种，连续 5 年被列为农业部主导品种。该品种的优良性状突出，高产、广适，耐肥抗倒，非常适合轻型栽培和机械化种植，受到农民的喜爱。中早 39 在两年国家区试中，比对照品种株两优 819（2006 年农业部认定的超级稻）增产 3.13%，生产试验中，比株两优 819 增产 6.1%。2013 年，中早 39 早稻百亩方亩产分别达到 682.67 公斤和 658.65 公斤，创浙江省早稻单产和百亩方高产吉尼斯纪录；2016 年，中早 39 以最高单产 747.85 公斤，百亩方平均亩产 713.84 公斤，再创浙江之最。

产量性状是由多基因控制的[1]，生物技术的应用可提高作物育种的速度和力度。但是，只有对决定作物产量潜力的生理特性的深入理解，才有可能进一步通

过分子生物途径寻找“产量基因”[2]。中早 39 高产和稳产特性突出，其高产形成原因亟待进一步解析。本研究通过回顾超级早籼稻品种中早 39 的选育过程，并针对中早 39 高产且稳产的特点，测定中早 39 与其系谱亲本嘉育 253 和中组 3 号的光合特性和光合色素含量，比较三个品种间生理指标的区别，探究中早 39 高产育种的思路，这为水稻高产育种提供理论依据。

1　材料与方法

1.1 材料

以中组 3 号和嘉育 253 为亲本，杂交并多代连续自交，获得稳定的新株系。中早 39 及其系谱亲本中组 3 号和嘉育 253 种植于中国水稻研究所试验基地，每个品种种植 3 个重复小区，每个小区行株距为 5 寸×5 寸，面积为 10.3 平方米，按常规方法进行田间管理。

1.2 中早 39 的选育

以高产早籼嘉育 253 为母本，以高产抗稻瘟病早籼新品种中组 3 号为父本杂交，并多代连续自交，分离世代全程进行自然病圃鉴定，在高世代结合稻瘟病混合菌株人工接种抗性筛选方法，获得稳定的抗稻瘟病新株系，进行小区产量鉴定，最终获得综合农艺性状优良的新品种中早 39。具体选育流程如图 1。

1.3 生理数据测定

在三个品种的穗分化始期、齐穗期、齐穗后 10 天、齐穗后 20 天共 4 个时期，测定光合速率和叶面积指数，取样测定各光合色素含量。

选择在晴朗无风的上午，各品种随机选取 5 株，于上午 9:00-11:00 采用美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合测定仪测定稻株最上部全展叶的净光合速率，每叶重复测 5 次。

各品种随机取最上部全展叶 10 片，液氮固定之后保存于-80℃冰箱中，比色法测定叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、总叶绿素含量和类胡萝卜素含量等光合色素成分[3]。

选取单株具有代表性的 20 片完全叶作为标叶，用米尺测量叶片长宽，叶面积指数（LAI）=长×宽×0.75。

1.4 产量相关性状测定

每个品种调查 5 个单株的产量性状，包括全生育期、株高、每株穗数、每穗总粒数、结实率、千粒重和小区产量。

1.5 数据分析

数据用 Microsoft Excel 2010 软件和 DPS 数据处理系统分析。

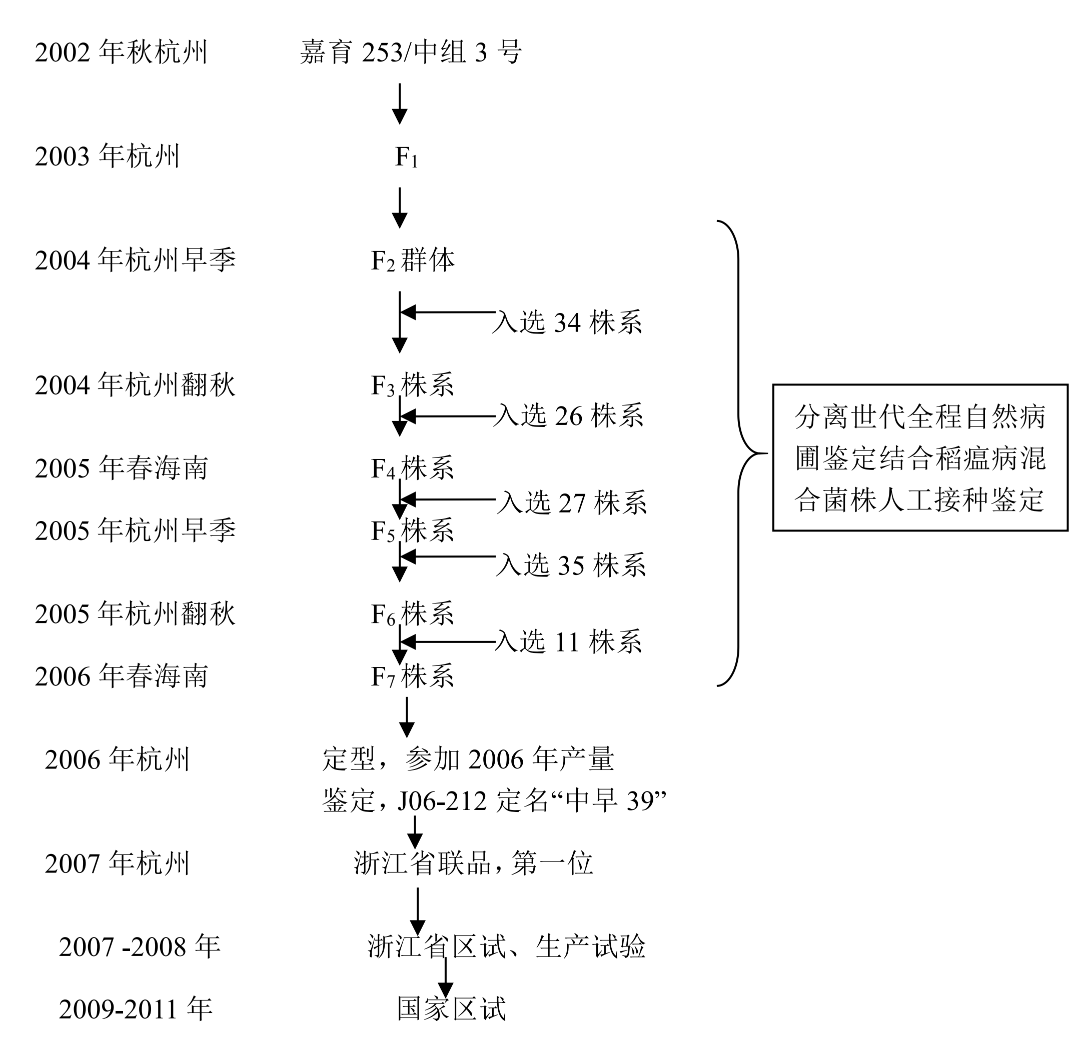


图 1 中早 39 的选育过程

Fig. 1 Breeding process of the variety Zhongzao39

2 结果与分析

2.1 中早 39 的选育过程及其特征特性

2.1.1 中早 39 的选育过程

利用组织培养和体细胞无性变异，选育获得保留了金早 47 的稻瘟病抗性水平且高产早籼稻品种中组 3 号。我们进一步以高产早籼嘉育 253 为母本，以中组 3 号为父本杂交，2003 年夏富阳收获 F_1 代，2004 年夏富阳种植 F_2 代，从中选择 34 株系翻秋种植 F_3 代，并从中选择 26 株系于海南种植成 F_4 代；2005 年夏富阳

种植 F_5 代 27 株系，从中选择 35 株系翻秋为 F_6 代，2005 海南种植 F_7 代 11 株系，于 2006 年春海南 F_7 定型。

其中，在品种选育的 F_2 代开始，利用稻瘟病自然病圃进行低世代群体抗性基因的筛选，在高世代，进行混合菌株人工接种鉴定和自然病圃双重筛选体系评价新品系的稻瘟病抗性，针对性地选育出高产且抗稻瘟病的新品种中早 39。人工接种比自然病圃鉴定不易受环境条件的影响，确保了接种结果的可重复性和可靠性；混合菌种比单一菌种接种可以筛选更多的稻瘟病抗性基因。通过田间抗性鉴定、稻瘟病抗性基因分子标记检测和基因测序等方法[4]，证实中早 39 含 *Pi-d2*、*Pi-d3*、*Pi36*、*Pi37*、*Pi5*、*Pib*、*Piz*、*Pik-h*、*Pi-ta*、*Pizt*、*Pi9* 和 *Pi64* 等 12 个稻瘟病抗性基因，确保了中早 39 稻瘟病的持久抗性。

中早 39 经过 2008-2009 年的浙江省区域试验，于 2009 年获浙江省水稻品种审定证书，2012 年始，中早 39 为浙江省区域试验新的对照品种。汇总 2008-2009 年和 2012-2017 年中早 39 在浙江省区域试验中稻瘟病抗性的结果（表 1），发现其抗性水平在 3 级或 3 级以下，多年度间都保持抗或高抗水平。说明中早 39 在近 10 年的稻瘟病抗性未出现退化，表现出持久的稻瘟病抗性，为其高产和稳产特性奠定基础。

表 1　中早 39 在浙江省区域试验中稻瘟病抗性的结果

Table 1 Blast resistance of Zhongzao 39 in Zhejiang province Regional Test

年份	叶瘟		穗瘟发病率		穗瘟损失率		综合指数	稻瘟病抗性评价
	平均	最高	平均	最高	平均	最高		
2008	0	0	3.5	1.5	2	0.5	0.6	抗
2009	0	0	0	0	0	0	0	高抗
2012	0	0	3	1.5	0.6	0.5	0.6	抗
2013	0	0	0	0	0	0	0	高抗
2014	2.5	5	4	5	1	1	2.8	中抗
2015	2	3	3	3	1	1	2	抗
2016	1.3	3	7		1		3	中抗
2017	0.7	1	5		1		2	抗

2.1.2 中早 39 的特征特性

中早 39 全生育期 112 天左右，比对照株两优 819 长 0.7 天，适合在长江流域的浙江、江西、安徽、湖南、湖北等省作双季早稻栽培。移栽后返青快，且整

个生育期间生长势旺盛，分蘖能力中等。株叶形态较为理想，株高 82.0cm，茎秆粗壮，抗倒伏能力强；叶鞘叶缘紫色，叶片挺直、较厚，宽窄适中，叶色中等偏深，谷粒稃尖紫色，无芒。后期较耐高温，穗基部灌浆较饱满，熟期转色好。

中早 39 主茎穗与分蘖穗发育进度较一致，抽穗整齐。每亩有效穗 19.6 万左右，成穗率 71.3%；每穗总粒数约 125.3 粒，实粒数 105 粒左右，结实率 84%左右，千粒重 26.0 克。

2007 年中早 39 推荐参加浙江省联品试验，平均亩产 519.13 公斤，居第 1 名，比对照嘉育 293 增产 10.71%（极显著）。2008 年参加浙江省早稻区试，平均亩产 474.5 公斤，比对照嘉育 293 增 8.3%，居第 1 名，比对照嘉育 293 增产极显著。2009 年参加浙江省早稻区试，平均亩产 500.7 公斤，比对照嘉育 293 增 4.9%，比对照嘉育 293 增产显著。浙江省两年区试平均亩产 487.6 公斤，比对照嘉育 293 增 6.5%。2009 年同步参加浙江省生产试验，平均亩产 510.2 公斤，比对照嘉育 293 增产 3.9%。2009 年参加长江中下游早籼早中熟组区域试验，平均亩产 507.8 千克，比对照株两优 819 增产 2.0%；2010 年续试，平均亩产 458.1 千克，比株两优 819 增产 4.4%。两年区域试验平均亩产 482.9 千克，比株两优 819 增产 3.1%。2011 年生产试验，平均亩产 523.7 千克，比株两优 819 增产 6.1%。

2.2 中早 39 及其系谱亲本产量相关性状比较分析

基于中早 39 的高产表现，我们调查了中早 39 及其系谱亲本嘉育 253 和中组 3 号的产量相关性状。从表 2 可知，虽然嘉育 253 在单株穗数上比中早 39 和中组 3 号要高，且差异显著，但中早 39 在每穗总粒数优于嘉育 253 和中组 3 号，且达极显著水平，中早 39 和中组 3 号的结实率则极显著高于嘉育 253。因此，超级稻品种中早 39 库容优势明显，有很好的产量潜力。最终的小区产量结果表明，中早 39 极显著高于嘉育 253，中组 3 号则产量最低。

表 2 三个品种的产量相关性状比较

Table 2 Comparison of yield traits between the three varieties

品种	全生育期（天）	株高（厘米）	单株穗数	每穗总粒数	结实率（%）	千粒重（千克）	小区产量折亩产（公斤）
中早 39	112	86.87 aA	8.33 bAB	241.82 aA	94.1 Aa	24.16 aA	508.95 aA
中组 3 号	113	85.43 aA	6.89 bB	195.13 Bab	93.5 aA	23.42 aA	326.94 cC

嘉育 253	112	90.15 aA	11.17 aA	205.40 bB	81.5 bB	23.51 aA	482.87 bB

Different lowercase letters mean significance at 5% level, and different capital letters mean significance at 1% level.

2.3 中早 39 及其系谱亲本光合速率比较分析

我们进一步分析了三个品种在光合效率上的差异表现。图 2 表明，在穗分化始期和齐穗期，中早 39 的净光合速率并没有表现为最高，嘉育 253 的净光合速率最高。随着时间的推移，三个品种的净光合速率逐渐下降。从齐穗期到齐穗后 10 天，中早 39 的净光合速率下降趋势明显变缓，嘉育 253 和中组 3 号的净光合速率逐渐低于中早 39。随后，中早 39 和嘉育 253 的净光合速率下降趋势基本一致，但中早 39 的净光合速率一直保持高于嘉育 253 的水平。中组 3 号的净光合速率则至始至终为三个品种中最低的水平，且在齐穗期后 10 天到齐穗期后 20 天期间，下降趋势也比另外两个品种快。因此，中早 39 在齐穗后保持最高的净光合速率，田间表现为抗早衰、青秆黄熟。

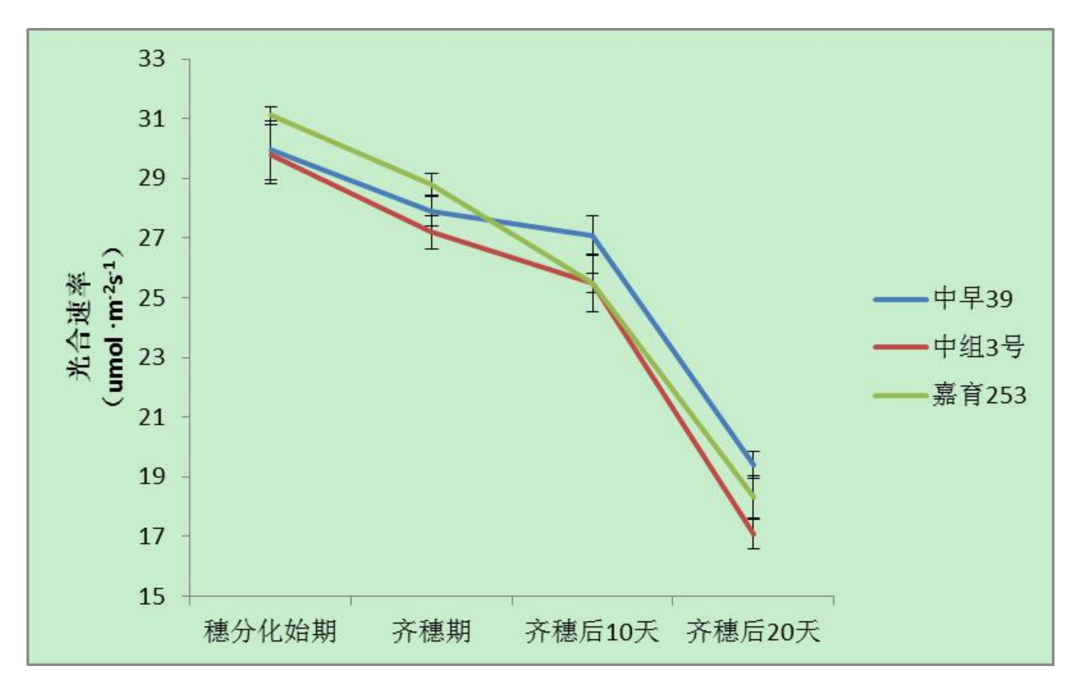


图 2 三个品种的净光合速率比较

Fig. 2 Comparison of net photosynthetic rate between the three varieties

2.4 中早 39 及其系谱亲本叶面积指数比较分析

对 4 个时间的叶面积进行测量和分析，获得三个品种的叶面积指数变化趋势，如图 3 所示。结果表明，随着时间的变化，中早 39 和嘉育 253 的叶面积指数先缓慢上升，再急剧上升，从齐穗后 10 天到 20 天期间，则缓慢下降。而中组

3 号则在穗分化始期到齐穗期期间出现缓慢下降，随后急剧上升，再缓慢上升。因此，三个品种在齐穗期到期随后 10 天期间，叶面积指数都出现急剧上升的趋势；而且，中早 39 的叶面积指数一直保持在三个品种中最高。

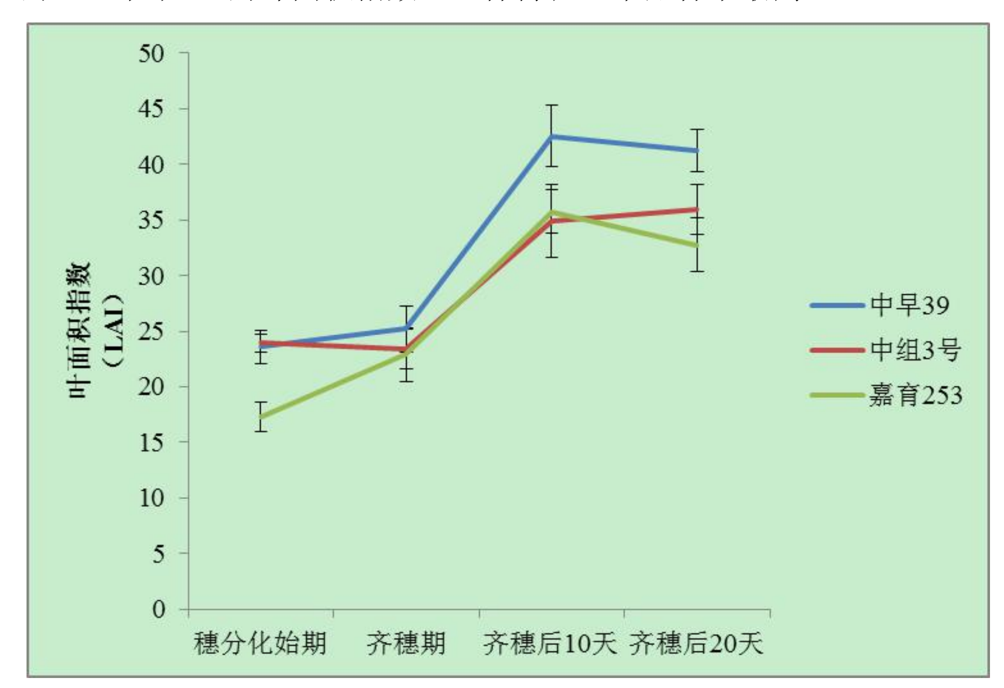


图 3 三个品种的叶面积指数比较

Fig. 3 Comparison of leaf area index between the three varieties

2.5 中早 39 及其系谱亲本光合色素比较分析

从图 4-图 7 可知，无论是叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量和总叶绿素含量，还是类胡萝卜素含量，三个品种中，中早 39 在 4 个时期几乎都保持最高水平。较高的叶绿素含量为具有超高产潜力的水稻品种叶片吸收更多光能提供了生理基础[5]。

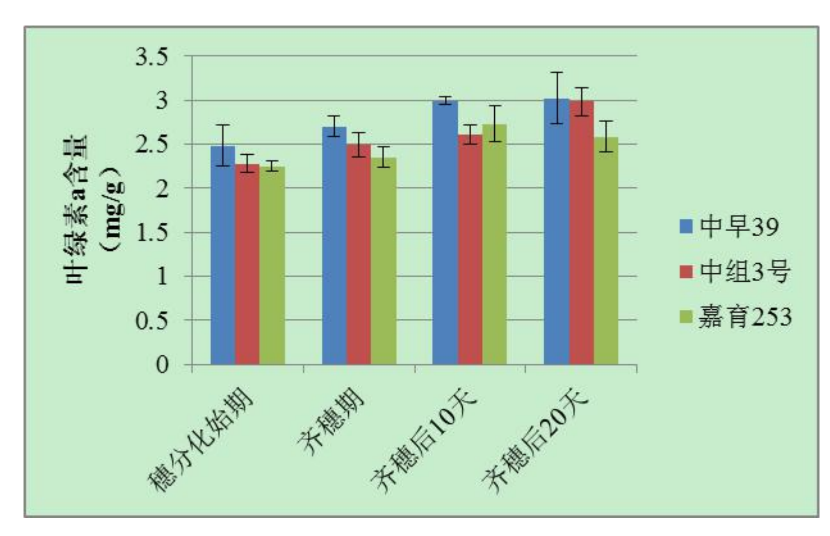


图 4 三个品种的叶绿素 a 含量比较

Fig. 4 Comparison of chlorophyll a content between the three varieties

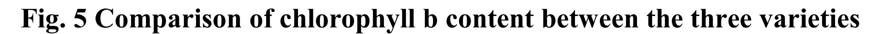


图 5 三个品种的叶绿素 b 含量比较

Fig. 5 Comparison of chlorophyll b content between the three varieties

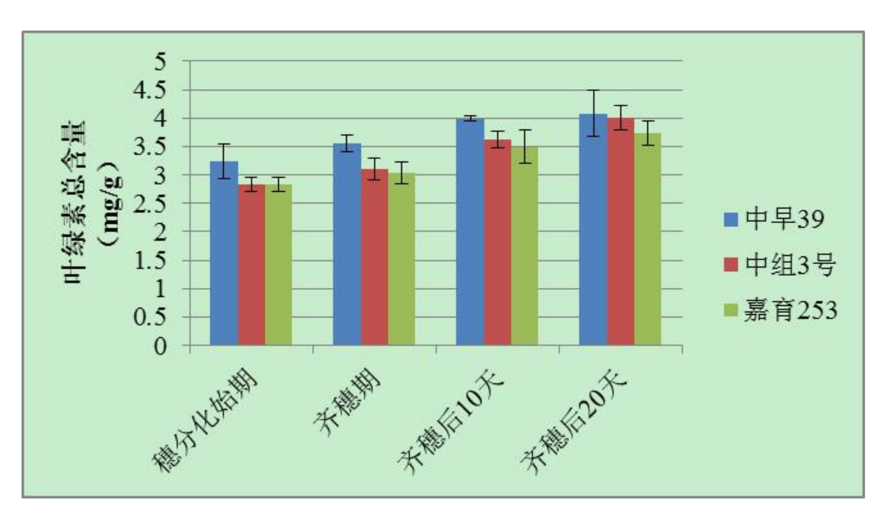


图 6 三个品种的叶绿素总含量比较

Fig. 6 Comparison of total chlorophyll content between the three varieties

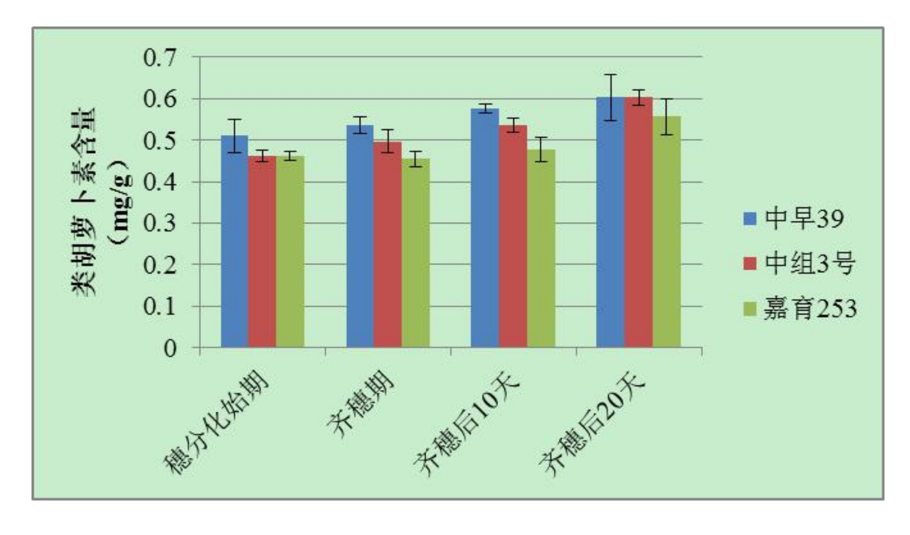


图 7 三个品种的类胡萝卜素含量比较

Fig. 7 Comparison of carotenoid content between the three varieties

3 讨论

根据育种目标正确选配杂交亲本，才能达到预期的效果。选用亲本性状的好坏直接关系到杂种后代的优劣，因此，正确选配亲本是杂交育种能否成功的关键之一。本研究中，早籼稻新品种的选育，首要目标就是高产，因此在选用杂交亲本时将高产的嘉育 253 为亲本之一，而中组 3 号的稻瘟病抗性的导入，则有利于新品种的稳产。

库容量大是超高产水稻的共同特征[6]，即超高产水稻有较多的每穗粒数、较高的千粒重以及与对照相当的结实率[7]。其中，群体颖花量的增加是产量增加的直接原因，大幅度增加穗粒数或培育大穗是超级稻扩大库容的主要途径[8-9]。本研究发现，三个品种的千粒重没有显著区别，但中早 39 具有较高的结实率和每穗粒数，而中组 3 号只是具有较高结实率，嘉育 253 则只是在穗数上占有优势。因此，中早 39 具有较大的库容，表现出超级稻的产量优势。

在增加库的基础上扩大源, 才能进一步增加水稻的产量 10-12]。水稻的源是由绿色的茎、鞘、叶以及根系等组成，其中功能叶是最主要的源。光合作用是作物产量形成的根源，超高产水稻应具有超高产的光合生理基础。光合物质生产能力、光合同化产物的运转和分配决定了产量的高低[13]。王强等[14]以超级杂交稻两优培九为材料，研究认为较高的光能是其超高产的重要原因。翟虎渠等[15]比较研究认为，抽穗前、后的物质生产能力和灌浆后期的光合功能是协优 9308 获得超高产的关键。水稻要高产，就必须增强叶的光合速率，提高适宜的叶面积指数[16]。本研究中，中早 39 较其两个系谱亲本而言，在齐穗期后（即进入灌浆期）具有更高的净光合速率，叶面积指数和各光合色素含量则在各个时期都保持最高，因此，中早 39 具有超高产光合生理特性。

水稻产量的提高总是伴随着源、库关系的不断改善以及与新型源库关系的建立[17-18]。本研究表明，与其系谱亲本相比，超级稻品质中早 39 库容大、产量高，具有较高的净光合效率，叶面积指数和各光合色素含量也明显高于其系谱亲本，表现出超亲的库源优势。已有的研究[5,14,19-23]针对超高产水稻产量形成和生理的关系时，一般都基于超级稻品种和对照品种进行比较研究，比较的品种之间遗传

背景不同；而本研究针对超级早籼稻品种中早 39 的高产稳产特性，分析了中早 39 及其系谱亲本中组 3 号和嘉育 253 在光合特性和光合色素上的差异，中早 39 的遗传背景来自两个系谱亲本。而产量潜力的增长是在育种过程中，高产基因的逐步积累和不利基因逐步去除的结果[14]。将超级稻品种与其系谱亲本进行比较，则是从表型上体现出高产基因的积累和不利基因去除的过程。中早 39 结合了中组 3 号高结实率的优点，却未发挥嘉育 253 单株穗数的优势，但是却表现出很高的每穗总粒数，体现出中早 39 的大穗型特点；在源方面，中早 39 的光合特性、叶面积指数和光合色素等都优于其系谱亲本，暗示中早 39 较其系谱亲本增大了库容，并相应地进行了开源。因此，中早 39 的选育，是扩库的基础上，整合了优良源相关基因，田间表现为理想的株叶形态，这为水稻高产育种的进一步提升提供理论依据。

参考文献

[1] Fasoula D, Fasoula V. Competitive ability and plant breeding. Plant Breeding Reviews, 1997, 14: 89–138.

[2] Duvick DN, Cassman KG. Post-Green revolution trends in yield potential of temperate maize in the north-central United States. Crop Science, 1999, 39:1622–1630.

[3] 王学奎. 植物生理生化试验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2006, 134-136.

[4] 梁燕, 季芝娟, 曾宇翔,等. 超级早稻中早 39 的稻瘟病抗性基因测定. 中国稻米, 2017, 23(5): 35-37.

[5] 曹树青, 翟虎渠, 钮中一, 等. 不同产量潜力水稻品种的剑叶光合特性研究. 南京农业大学学报, 2000, 23(3): 1- 4.

[6] 杨惠杰, 杨仁崔, 李义珍, 等. 水稻超高产的决定因素. 福建农业学报, 2002, 17(4): 199-203.

[7] 谢华安, 王乌齐, 杨惠杰, 等. 杂交水稻超高产特性研究. 福建农业学报, 2003, 18(4): 201-204.

[8] Sheehy J E, Dionora M J A, Mitchell P L. Spikelet numbers, sink size and potential yield in rice. Field Crops Research, 2001, 7: 77-85.

[9] 吴文革，张洪程，吴桂成,等．超级稻群体籽粒库容特征的初步研究．中国农业科学, 2007, 40(2): 250-257.

[10] 马文波，马均，明东风，等．不同穗重型水稻品种剑叶光合特性的研究．作物学报, 2003, 29, 236－240.

[11] 陈温福，徐正进，张龙步．北方粳型超级稻育种的理论与方法．沈阳农业大学学报,2005, 36:3－8.

[12] 程式华，曹立勇，陈深广，等．后期功能型超级杂交稻的概念及生物学意义．中国水稻科学, 2005, 19: 280－284.

[13] 吕军，王伯伦，孟维韧，等.不同穗型粳稻的光合作用与物质生产特性.中国农业科学, 2007, 40(5): 902-908.

[14] 王强，卢从明，张其德，等．超高产杂交稻两优培九的光合作用、光抑制和C4 途径酶特性．中国科学（C 辑）,2002,32(6): 481-487.

[15] 翟虎渠，曹树青，万建民，等．超高产杂交稻灌浆期光合功能与产量的关系．中国科学(C 辑), 2002, 3: 211-217.

[16] 盛大海，刘元英，李广宇 (2009). 水稻源库关系研究进展与应用．东北农业大学学报 40(5), 117－122.

[17] 黄育民，陈启锋，李义珍．我国水稻品种改良过程源库特征的变化．福建农业大学学报, 1998, 27, 271–278.

[18] 屠乃美，官春云．水稻幼穗分化期间减源对源库关系的影响．湖南农业大学学报, 1999, 25, 430–436.

[19] 姜元华，许轲，赵可，等．甬优系列籼粳杂交稻的冠层结构与光合特性．作物学报, 2015, 41(2): 286-296.

[20] 陈小荣，孙嘉，肖自京，等．不同产量潜力杂交早稻品种的群体自动调节力差异及其生理机制研究．江西农业大学学报 2012,34(5) : 851 － 858.

[21] 付景，陈露，黄钻华，等．超级稻叶片光合特性和根系生理性状与产量的关系．作物学报, 2012, 38(7): 1264-1276.

[22] 吴桂成，张洪程，钱银飞等．粳型超级稻产量构成因素协同规律及超高产特征的研究．中国农业科学, 2010, 43(2): 266-276

[23] 邓启云，袁隆平，蔡义东，等．超级杂交稻模式株型的光合优势．作物学

报,2006, 32（9）：1287-1293

季芝娟，女，38 岁，副研究员，研究生；
杨长登，男，55 岁，研究员，研究生。
单位通信地址：浙江省杭州市富阳区水稻所路 28 号，中国水稻研究所
邮编：311400；
联系电话：手机：13067979849，办公室：0571-63370186